

Szerkezeti rendezettség vizsgálata rétegszerkezetű ásványokban

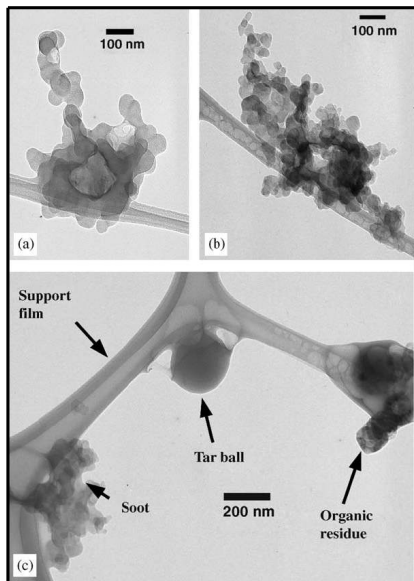
Szakmai zárójelentés
OTKA Posztdoktori Ösztöndíj (azonosító: PF 63973)

Kovácsné Kis Viktória

A kutatás témája olyan rétegszerkezetű anyagok transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálata, melyek nanokristályos karakterükből kifolyólag más szerkezetvizsgáló módszerrel nem tanulmányozhatóak. A vizsgálatok tárgyát képező anyagok környezeti szempontból érdekesek (levegő-, illetve talajszennyezés), az eredmények a nanoskálán zajló reakciók szerkezeti hátterének feltárásához járulnak hozzá. A kutatás tudományos eredményeit a vizsgált anyagok szerint mutatom be

1.) Léggöri koromrészecskék hidrogéntartalma:

Léggöri korom részecskék – egy, a K-pusztai meteorológiai megfigyelőállomáson gyűjtött, mérsékelt szennyezett, tipikusnak mondható kontinentális aeroszolból (CE) és egy, a dél-afrikai Kruger Nemzeti Park területéről, szavannatűz füstjéből (SF) származó korom – összetételét, a korom részecskéket alkotó nanogöbcecsek méretét, illetve az egyedi koromrészecskék szerkezetét vizsgáltam (1. ábra).



1. ábra: Nagy széntartalmú nanorészecskék léggöri aeroszolból (a) korom, K-pusztai (b) korom, Kruger Nemzeti Park (c) korom, kátrány nanogöbcecsek és szerves eredetű szénrészecske, K-pusztai

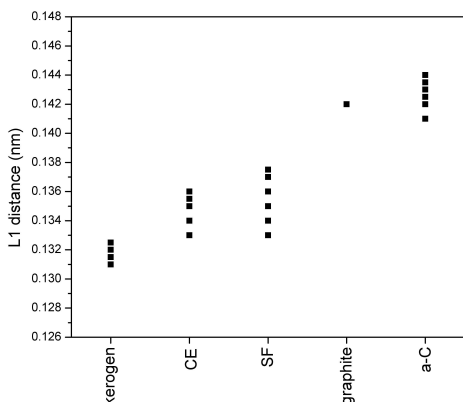
A szelektált területű elektrondiffrakciós (SAED) felvételek zömében amorf, ill. esetenként részben rendezett szerkezetre utalnak. A nagyfelbontású felvételeken hagymahéjszerűen görbült grafénsíkok láthatóak, melyek között a távolság cca. 3.5 \AA (nagyobb, mint a grafit $d(001)$ távolsága).

Az amorf koromszerkezet kvantitatív jellemzéséhez a SAED felvételeken mérhető szórt intenzitásból Fourier transzformációval számoltam páreloszlásfüggvényeket, melyek az atomtávolságok gyakorisági eloszlását mutatják (2. ábra). A leggyakoribb elsőszomszéd atomtávolság

légköri koromban 0.133–0.137 nm mintától, illetve méréstől függően, ami rövidebb, mint grafitban (1.42 Å) [1,2].

Argon atmoszférában magnetron porlasztással 100-400 Å vastag amorf szénrétegeket állítottam elő, és összehasonlításuképpen megvizsgáltam páreloszlásfüggvényüket. Az amorf szénen mért atomtávolságok (1.41-1.43 Å) jól egyeznek a grafitra jellemző értékkel, a szórás az amorf karakter sajátossága [3].

Egy geológiai nanoszén-csoporton, magas (>90%) szén- és hidrogéntartalmú ($H/C = 0.61$) kerogénekben is végeztem hasonló vizsgálatokat annak tisztázására, hogy a légköri koromrészecskék esetleges hidrogéntartalma okozhat-e mérhető változást a páreloszlásfüggvényen. A kerogén mintákért Sajgó Csanádnak (MTA Geokémiai Kutatóintézet) tartozom köszönettel. A leggyakoribb elsőszomszéd atomtávolság ezen kerogénminták esetében 0.131-0.132 nm [1].



2. ábra: SAED mérésekből számított elsőszomszéd atomtávolságok kerogénekben, K-pusztai koromrészecskékben (CE), szavannatűz füstjéből származó koromrészecskékben (SF), és argonatmoszférában porlasztott amorf szénben (a-C). A grafit atomtávolsága irodalmi adat.

Az argon atmoszférában előállított, hidrogénmentes amorf szén és a magas H/C arányú kerogének atomtávolság-értékei között reprodukálhatóan mérhető jelentős különbség van, amit a mintákra jellemző H/C értékekkel magyaráztam. A hidrogéntartalom növekedésével megnő a C-H kötések aránya (kb. 0.11 nm), ami a leggyakoribb atomtávolság-érték csökkenéséhez vezet. A rendezetlen szerkezetben a páreloszlásfüggvényen a csúcsok kiszélesednek, így a C-H és C-C csúcsok nem válnak külön. Az eredő csúcs maximuma az amorf szénre (és a grafitra) jellemző értéknél kisebb lesz. A csökkenés mértéke a H/C arányt tükrözi [1]. Az egyedi koromrészecskék hidrogéntartalmát a plazmonenergia-mérésekkel is alátámasztottam [4]. Eredményeimet az MTA Fizikai Osztályának ülésén is bemutattam [5].

A munka jelentősége két oldalról közelíthető meg: egyrészt egyedi koromrészecskék vizsgálatával lokalizáljuk a légköri szenes anyagban spektroszkópiai módszerekkel mérhető hidrogén egy részét. Másrészt, elektrondiffrakciós mérésekből következtetünk kis anyagmennyiségben lokalizálódó hidrogén jelenlétére, kihasználva ezzel módszerünk előnyeit a többi (röntgen- és neutron-)diffrakciós módszerekkel szemben. A légköri aeroszol hidrogéntartalmát közlő folyóiratcikk [1] eddig 18 független SCI-s hivatkozást kapott.

2.) Talajagyagok analitikai TEM vizsgálata:

Kompetitív adszorpciós kísérleteknek alávetett talajminták agyagfrakcióját vizsgáltam analitikai elektronspektroszkóppal. A kísérleteket Sipos Péter végezte a Geokémiai Kutatóintézetben. Részletesen tanulmányoztam a Cu-Zn-Pb-Cd adszorpcióját *egyedi* talajásvány-szemcséken (montmorillonit, vermikulit, illit, gyengén rendezett vas-(oxi)hidroxid, karbonát). A vizsgált nehézfémionok két

csoportra oszthatók: a nagymértékben adszorbeált Cu és Pb, illetve az alig, vagy kismértékben adszorbeált Zn és Ni. Megállapítottam, hogy az agyagásványszemcsék mellett az adszorbensek fontos csoportját alkotják a gyengén rendezett, nanokristályos vas-(oxi)hidroxid fázisok, melyek gyakran társulnak a hasonló mérettartományú agyagásványokhoz, lényegesen növelve ezzel az adott (agyag)ásvány-részecske adszorpciós kapacitását a magas vastartalmú talajféleségekben. Továbbá, az egyes szilikátszemcsék adszorpciós képességét nagymértékben megnöveli a felületükön kialakuló nagyságrendileg 10-100 nanométer vastagságú vas-(oxi)hidroxid bevonat, így akár eredetileg nem adszorbeáló fázisokhoz (pl. kvarc) is kapcsolódhat nehézfém-tartalom.

Eredményeinket két folyóiratcikkben publikáltuk [6, 7], melyekre eddig összesen 26 független SCI-s hivatkozás érkezett. Az analitikai TEM jelentőségét a talajagyagok adszorpciós folyamatainak vizsgálatában, illetve a nanokristályos vas-(oxi)hidroxid szerepére vonatkozó megállapításokat több hivatkozó is kiemeli.

3.) Szmektitiek kristályszerkezete:

a.) Vakanciaeloszlás vizsgálata montmorillonitban a $hk0$ reflexiók SAED-del mért amplitúdói alapján

A dioktaéderes szmektitiek szerkezetét és duzzadással kapcsolatos tulajdonságait leggyakrabban röntgen-pordiffrakciós mérésekből következtetik. Szisztematikus kristályszerkezet-vizsgálatot csak elvétve végeznek. Ennek elsődleges oka a kicsi krisztallitméret és a TOT rétegekötegek gyenge rendezettsége következtében kialakuló kétdimenziós szerkezet, mely a konvencionális egykristályszerkezet-analízist nem, vagy csak bizonyos megkötésekkel teszi lehetővé.

A rétegnormális felől készített lokális elektrondiffrakciós felvételek azonban, kiválóan alkalmasak a kétdimenziós szerkezet vizsgálatára. Atomierő mikroszkópos vizsgálatok (Ploehn, Liu, 2006) azt mutatták, hogy az egyedi montmorillonit lemezek 1-2 nm vastagok (dehidratált, 10 Å-ös montmorillonit). Ebből következik 1.) a diffrakció kinematikus elméletének alkalmazhatósága, illetve 2.) hogy az egyes diffrakciós gyűrűk mentén mérhető 6-10 különálló reflexió mindegyike max. 2 szomszédos rétegekötegből származik.

TEM-EDS-sel (energiadisziperzív spektrométer) mért képlet alapján számoltam cisz-, transz-, és random vakanciás 10 Å-ös dioktaéderes rétegszilikát $hk0$ vetületének diffrakcióját, és vizsgáltam a hk reflexiók amplitúdóváltozását 200 Å vastagságig. Megállapítottam, hogy az összetétel lényegében nem befolyásolja az amplitúdóarányokat, a vakanciaeloszlás azonban egyértelműen tükröződik bennük. Energiaszűrt¹ SAED felvételeken mért és a számolt amplitúdókat összevetettem a kérdéses (10-20 Å) vastagságtartományban. Megállapítottam, hogy Wyoming montmorillonitban a vakanciaeloszlás egy-egy 10-20 nm vastag lemezkén belül is heterogén, azaz rétegekötégről rétegekötegre változik. A Cheto montmorillonit esetében a mért amplitúdók között a számoltaknál kisebb a különbség, ami további diszkussziót tesz szükségessé [8]. Az eredmények folyóiratban való közlését a rétegtöltés számításokba való beillesztése és a magyar vonatkozású Istenmezeje bentoniton elvégzett hasonló mérések után tervezhető.

1 Az energiaszűrt elektrondiffrakciós felvételeken a minta-elektronsugár kölcsönhatás során rugalmatlanul (energiavesztéssel) szóródó elektronok okozta háttérintenzitást kiszűrjük és csak a rugalmas (energiavesztés nélküli) szóródást detektáljuk. Így az adatfeldolgozás során egyrészt nincs szükség a háttérintenzitás manuális eltávolítására ami hibaforrás lehet, másrészt jobb jel/zaj aránnyal tudunk dolgozni, aminek főleg a kicsi mért intenzitások esetében (pl. a vizsgált néhány nanométeres szmektitlemezkek) van jelentősége.

b.) Ungvárit: nontronit és tridimit/cristobalit epitaxia²

Korábbi, Dódony Istvánnal (ELTE Ásványtani Tanszék) való együttműködés során született szerkezetvizsgálati (SAED, HRTEM) eredményeket (Kis, 2004) kémiai analitikával egészítettük ki. TEM-EDS pontanalízisek sorozatával megállapítottam, hogy a gönci ungvárit (kloropál) alumíniumtartalma alacsony (0-1 at%), kationok túlnyomó részét szilícium és vas alkotja. A vastartalom 5-20 at% szélső értékek között változik, tipikusan a 8-11 at% tartományba esik. A mért Si/(Fe+Al+Mg) arány, ahol a (Fe+Al+Mg) a potenciálisan oktaéderez kationokat jelöli, 0.5-4 értékek közé esik. Ez igen nagymértékű változatosságot jelent, ami nincsen összhangban a nontronit kristálykémiájával, magyarázható azonban a megfigyelt SiO₂/nontronit nanokompozit szerkezettel.

További jellegzetesség a szisztematikusan mérhető, a Hoffmann-féle szmektit szerkezeti modellhez képesti többlet oxigén. Ezt maga a nanokompozit szerkezet nem magyarázza, hiszen mind a Hoffmann-modell (eltekintve a kis mennyiségű rétegek közti kationoktól), mind a SiO₂ 66.6 at% oxigént tartalmaz. Töltésegyensúlyt föltételezve a kloropálban mérhető 65-70 at% oxigén egy része szükségszerűen szerkezeti hidroxil formájában van jelen. Ez összhangban van az Edelman-Favejee-féle, átfordult SiO₄ tetraédereket tartalmazó modellel (70 at% oxigén, oxigének 75%-a hidroxilt alkot), melyet kloropálra alkalmaztunk (módosított modell 68.5 at% oxigén, melyek 44%-a hidroxilt alkot). A kloropálban mérhető oxigéntartalombeli különbségek nanoskálájú kémiai és szerkezeti heterogenitásra utalnak.

Eredményeinket publikálásra benyújtottuk a Clay Mineralshoz, jelenleg bírálat alatt van [ms1].

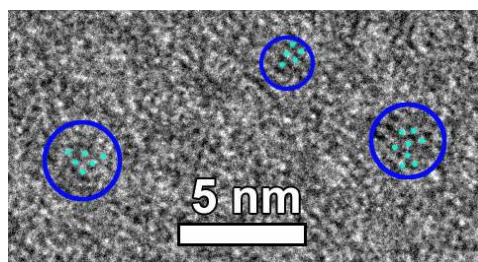
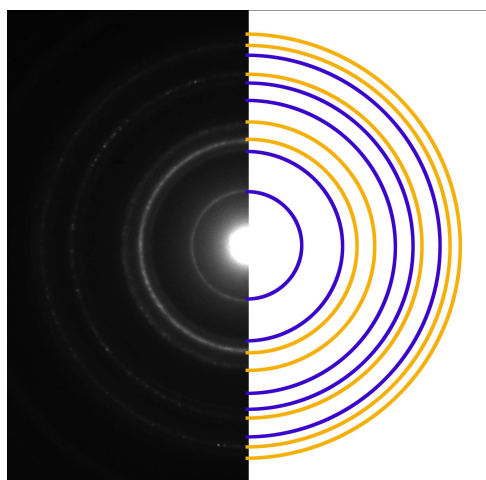
c.) Rendezett és amorf szerkezetű nanodomének vulkáni üvegben

Magas SiO₂-tartalmú vulkáni üvegek (obszidián és horzsakő) vizsgálata során azt tapasztaltam, hogy amorf szerkezetű „üveges” és nanokristályos komponensből áll (Kis V. 2004). Az „üveges” komponens rövid- és középtávú rendjét SAED mérésekből számolt atomtávolságokkal jellemeztem [9]. Ezen vizsgálatok egy része már a PhD dolgozatomban is szerepel (Kis V. 2004), de a végleges adatfeldolgozás és diszkusszió, illetve az eredmények publikálása [9] már az OTKA Posztdoktori Ösztöndíj idején történt.

A nanokristályos komponens mélyrehatóbb vizsgálatára az elmúlt évben került sor. Nanokristályos aranyat használva belső standardnak (a mintahordozó rostélyt borító szénhártya mintával átellenes oldalára párologtatva) ± 0.005 Å pontossággal mértem a sugár mentén összegzett szórt intenzitásmaximumok helyét. Megállapítottam, hogy a gyűrűkhöz tartozó d-értékek jól közelítik a szmektitek (pl. nontronit) d(hk0) értékeit. 0-40° között készített döntési sorozatok elemzésével megállapítottam továbbá, hogy ebben a tartományban a horzsakő nanokristályos komponense nem texturált, a szórt intenzitás eloszlása a gyűrű mentén egyenletes akár 50 nm-es területátmérő esetén is [10].

Jól reprodukálható TEM-EDS mérések tanúsága szerint a nanokristályos komponens 4-5 at% vasat tartalmaz, szemben az amorf komponenssel, ahonnan gyakorlatilag hiányzik a vas. Az alkáliák tekintetében is tapasztalható némi különbség az amorf és nanokristályos területek között, ez azonban nagyságrenddel elmarad a vastartalomban mérhető eltéréstől [10].

2 Két különböző összetételű anyag meghatározott kristálytani irány szerinti összenövése (Klein & Dutrow, 2007). Vizsgálataink szerint az ungvárit esetében a nontronit tetraéderrétege kapcsolódik a tridimit/cristobalithoz (Kis 2004). A közös sík a nontronit (001) és a tridimit (001). A nontronit és tridimit/cristobalit egységei 5-10 nm vastag kötegeket alkotnak ebben a nanokompozit szerkezetben.



3. ábra: A SAED felvételen (balra) aransárga szín jelöli a belső standardként használt arany nanorészecskék diffrakciós gyűrűit, kék szín jelöli a horzsaő nanokristályos komponensének diffrakciós gyűrűit. A nagyföldoldású (HRTEM) felvételen (jobbra) bekarikázott területek rendezett nanodoméneket mutatnak. A világoskék pontok az atomi oszlopokat jelölik.

A SAED megfigyeléseket értelmezendő radiális intenzitáseloszlásokat számoltam tridimitre, cristobalitra, illetve a vastartalomra való tekintettel nontronitra és az ungváritban megfigyelt nanokompozit szerkezetekre. A számolások során véletlenszerűen elhelyezkedő doméneket tételeztem föl, melyek méretét változtattam (0.6 Å, 11 Å, 25 Å - összhangban a nagyföldoldású mikroszkópos (HRTEM) megfigyelésekkel, 3. ábra). Az eredmények szerint a horzsaő nanokristályos komponensében mért intenzitáseloszlás jól modellezhető az ungváritban is megfigyelt tridimit/cristobalit/nontronit nanokompozit szerkezeti modellel, mely - szmektitoldalról nézve - átfordult SiO_4 tetraédereket tartalmaz [11]. Ez az értelmezés magyarázatot ad az amorf és nanokristályos részek vastartalombeli-eltérésére, a nontronit-szerű diffrakciós gyűrűkre és a textúra hiányára.

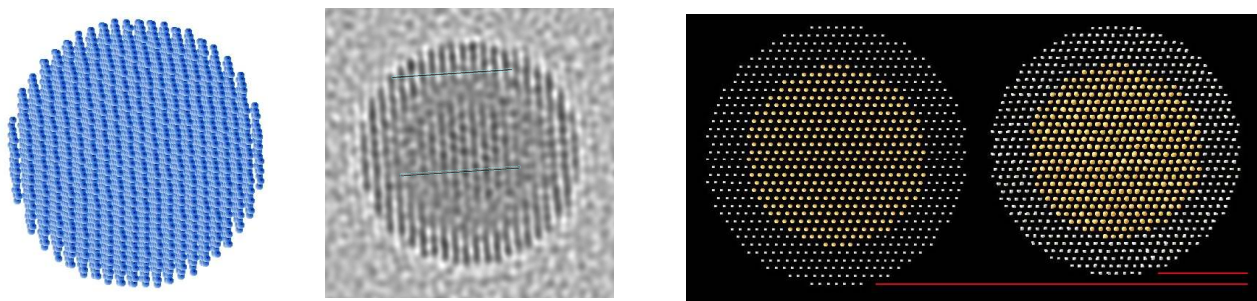
4.) Nanorészecskék nagyföldoldású elektronmikroszkópos (HRTEM) vizsgálata:

Kollégákkal vizsgáltuk az előző részben említett nanokristályos arany belső standardként való alkalmazhatóságát HRTEM-ben [12].

5 nm átmérőjű arany nanorészecskék (fcc, és többszörösen ikresedett részecske (MTP: ötös iker, illetve ikozaéder)) szerkezeti modelljét készítettem el. Az fcc nanorészecske modellt 2 tengely körül 0-90, illetve 0-40 fok tartományban 10 fokos lépésközzel kidöntöttem és a részecskéről HRTEM szimulációt készítettem, összesen 40 különböző orientációban vizsgálva a részecskét. A szimulációk során egy konvencionális JEOL és egy gömbi hiba³ korrekcióra alkalmas FEI Titan mikroszkóp leképezőrendszerének hatását vizsgáltam(4. ábra) .

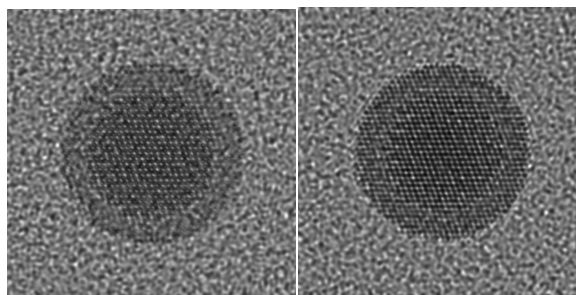
Megállapítottam, hogy a HRTEM-ben mérhető $d(111)$ -értékek a nanorészecske orientációjától függően, általában 0-2%, bizonyos esetekben pedig akár 10% eltérést is mutathatnak az ideális értéktől. Továbbá, bizonyos orientációkban a leképezőrendszer sajátosságából adódó kontrasztátfordulás is nehezíti a pontos periódus-meghatározást, illetve hibamentes kristályban is látszólag elvégződő rácssíkok kialakulásához vezet. A gömbi hiba korrekciója gyakorlatilag megszünteti az optikai műtermékeket, ugyanakkor a rácspériódus szórása, csökkent mértékben, de megmarad [13].

3 A konvencionális transzmissziós elektronmikroszkópok objektívlencsájének gömbi hibája (szférikus aberráció).....



4. ábra: (bal oldal) Példa a konvencionális TEM leképező-rendszerének hatására: $z=60^\circ$ és $x=40^\circ$ -os orientációban lévő arany nanorészecske (modell balra) HRTEM képen látszólagos rácssík-elvágódás látható.

(jobb oldalt): fent balra mag-héj szerkezetű Au/Pd nanorészecske modellje látható, a Pd héj atomjai Au rácspontokban vannak. Fent jobbra mag-héj szerkezetű Au/Pd nanorészecske modellje látható 300 K-en történt relaxáció után. A modellek alatt a szimulált HRTEM képek. A relaxáció során jelentős rácskontrakció lépett fel.



Mindezeknek nagy jelentősége lehet geológiai vonatkozású nanorészecskék (pl. magnetit-hematit, gyémánt-lonsdaleit elkülönítés) vizsgálata során, illetve katalízisben gyakran alkalmazott mag-héj szerkezetű kétkomponensű nanorészecskék esetében, amikor a leképezőrendszer sajátosságaiból adódó jelenségek tévesen valós szerkezeti jelenségekként értékelhetők. Ez azonban HRTEM szimulációk, illetve lehetőség szerint kiegészítő analitikai vizsgálatok segítségével kiküszöbölhető.

Összefoglalás, az eredmények hasznosíthatósága

A nanoanyagok vizsgálatának ideális eszköze a transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM) és a hozzá kapcsolódó lokális analitikai módszerek. A kutatómunka során rétegszerkezetű nanoanyagokról TEM-mel környezeti-geológiai szempontból lényeges új ismeretekhez jutottunk, melyek komplementer módon egészítik ki a rutinszerűen alkalmazott nem lokális vizsgálatok eredményeit.

Légköri koromrészecskék esetében a görbült grafénsíkok hidrogén, azaz aromás tartalmára derítettünk fényt, szmektitek esetében a vakanciaeloszlás heterogenitását vizsgáltam néhány réteggöteg-szinten, illetve a réteges szilícium-dioxid szerkezetek és a szmektitszerkezet kapcsolatát boncoltam egy nanokompozit és egy nanokristályos üveg példáján.

Analitikai TEM-et alkalmaztam a talajban lezajló adszorpciós folyamatok nyomonkövetésében. A talajban adszorbeált nehézfém-ionok egyes talajalkotó fázisokon való megkötődését vizsgáltuk. Rámutattunk a nanokristályos vas-(oxi)hidroxid bevonat adszorpciós tulajdonságokat módosító, véleményünk szerint igen fontos szerepére, aminek közvetlen gyakorlati jelentősége van.

A nagyföldoldású vizsgálatokhoz (HRTEM) kapcsolódóan szimulációkat készítettem, melyek nanorészecskék kvantitatív HRTEM vizsgálata során szolgálhatnak támpontul.

Ezúton is köszönöm az OTKA-nak a kutatásaimhoz nyújtott támogatást. Köszönöm továbbá, hogy lehetővé tette számomra, hogy gyermekszületésre való tekintettel két évre megszakítsam kutatásaimat

(2008-2009).

Hivatkozások:

Kis V. (2004): Az SiO₂-térháló szerkezetének vizsgálata mikros- és nanokristályos, illetve amorf mintákon
Doktori disszertáció, ELTE, Budapest 100 p.

Klein, C. & Dutrow, B. (2007): Manual of Mineral Science 23rd ed. Wiley & Sons 675 p.

Ploehn, H. J. & Liu, C. (2006) Quantitative Analysis of Montmorillonite Platelet Size by Atomic Force Microscopy. Industrial & Engineering Chemistry, 45, 7025-7034.

Az OTKA Posztdoktori Ösztöndíjam alatt született publikációk:

[1] Kis, V.K., Pósfai, M. & Lábár, J.L.: Nanostructure of atmospheric soot particles., Atmospheric Environment 40. 5533-5542., (2006)

[2] Pósfai M., Simonits R., Kovács Kis V. Lábár J.: Compositions, structures, and surface properties of carbonaceous aerosol particles from the continental atmosphere., 19th General Meeting of the IMA, 23-28 July 2006 Kobe, Japan. Program & Abstracts, 268, (2006)

[3] Grasin RO, Lábár JL, Kis VK, Sedláčková K, Radnóczy G: Glassy carbon between amorphous carbon and crystalline graphite, structural differences revealed by TEM, SAED and EELS. Acta Metallurgica Slovaca 13. 150-154 (2007)

[4] V. Kovács Kis, M. Pósfai, J. L. Lábár: SAED study of atmospheric soot particles implies hydrogen content., 5th Workshop on EELS/EFTEM, 27-29 September, Vienna, Program and Abstracts, 33, (2006)

[5] Kis V.: Amorf szénszerkezetek. Előadás az MTA Fizikai Osztályának ülésén, 2007. június 6.

[6] Sipos P, Németh T, Kovács Kis V, Mohai I: Sorption of copper, zinc and lead on soil mineral phases. Chemosphere 73. 461-469. (2008)

[7] Sipos P, Németh T, Kovács Kis V, Mohai I: Association of individual soil mineral constituents and heavy metals as studied by sorption experiments and analytical electron microscopy analyses Journal of Hazardous Materials 168. 1512-1520. (2009)

[8] V. Kovács Kis: Energy filtered electron diffraction studies on Wyoming montmorillonite crystals Euroclay, Aveiro, Portugal (2007)

[9] Kovács Kis, V., Dódony, I. & Lábár, J.L.: Amorphous and partly ordered structures in SiO₂ rich volcanic glasses. An electron diffraction study., Eur. J. Miner. 18. 745-752., (2006)

[10] V.K. Kis, T. Németh, M. Keresztes: TEM Study of Partially Ordered Silicate Glass. Annual Meeting of the Hungarian Society for Microscopy, Siófok, 2011 május 19-21. Szóbeli előadás (2011)

[11] V.K. Kis, T. Németh, M. Keresztes: Iron Induced Crystallization in Silicate Glass.

ISMANAM2011 (International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials, 2011. jún. 26-júl. 1) Book of Abstracts p. 230. poszter (2011)

[12] G. Sáfrán, O. Geszti, V. K. Kis, and Zs. Kovács: Limitations of the internal calibration of HRTEM and size effect measurements by means of Au reference nanoparticles. Annual Meeting of the Hungarian Society for Microscopy, Siófok, 2011 május 19-21. Szóbeli előadás (2011)

[13] V.K. Kis, O. Geszti, P. Süle, Zs. Kovács and G. Sáfrán: HRTEM Simulation of Au and Au-Pd Core-Shell Nanoparticles. ISMANAM2011 (International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials, 2011. jún. 26-júl. 1) Book of Abstracts p. 214. poszter (2011)

[ms1] Dódon, I, Nemeth T., Kis V.K (corresponding author): Silica/smectite association in chloropal. Submitted to Clay Minerals.

Az OTKA Posztdoktori Ösztöndíjam alatt született, a kutatási témámhoz lazábban kapcsolódó publikációk:

[1] Hobor S, Revesz A, Szabo PJ, Zhilyaev AP, Kis VK, Labar JL, Kovacs Z
“High pressure torsion of amorphous Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀ alloy”
Journal of Applied Physics 104. 10.1063/1.2964115. (2008)

Hozzájárulásom: amorf szerkezet devitrifikációjának vizsgálata (HR)TEM-mel

[2] Fejes P, Kis V, Lazar K, Marsi I, Nagy JB
“Various nano-size iron oxide polymorphs on mesoporous supports I - New mesoporous catalyst supports synthesized in acidic and alkaline media”
Microporous and Mesoporous Materials 112. 377-391. (2008)

Hozzájárulásom: katalizátorhordozó mezoporózus SiO₂-ban 15-20 nm-es kristályos béta-tridimit és kvarc nanoszemcséket mutattam ki HRTEM-mel

[3] Szenes G, Kovacs VK, Pecz B, Skuratov V
“The effect of heavy cosmic-ray ions on silicate grains in the interstellar dust”
Astrophysical Journal 708. 288-292. (2010)

Hozzájárulásom: nagyenergiás vasion-, illetve argonion-nyalábbal besugárzott forsteritet vizsgáltam (HR)TEM-mel

Publikációk összesítve:

5db folyóiratcikk + 3 db folyóiratcikk egyéb témakörben
1 db folyóiratcikk benyújtva
7 db konferencia absztrakt

Az elmúlt év eredményei egyelőre csak konferencia absztrakt formájában lettek publikálva, ezekből a közeljövőben szándékozom folyóiratcikket készíteni:

- [1] V.K. Kis, T. Németh, M. Keresztes: Iron Induced Crystallization in Silicate Glass. J. Non-Crystalline Solids-ba

- [2] V.K. Kis, O. Geszti, P. Süle, Zs. Kovács and G. Sáfrán: HRTEM Simulation of Au and Au-Pd Core-Shell Nanoparticles. Applied Catalysis A-ba